

광대역 신호의 주파수 영역 간섭 패턴을 이용한 해저면 음속 추정 연구

A Study on Estimation of the Sound Speed of Seabed from the Frequency-dependent Interference Pattern of Broadband Signal

이 성 욱*, 한 주 영*, 김 남 수*, 나 정 열*, 박 정 수**
(Seongwook Lee*, Jooyoung Hahn*, Namsoo Kim*, Jungyul Na*, Joung-Soo Park**)

* 한양대학교 지구해양학과, ** 국방과학연구소 제2체계개발본부

(접수일자: 2003년 7월 7일; 채택일자: 2003년 7월 25일)

음원과 수신기 사이의 거리가 고정된 상태에서 측정한 광대역 천이 신호의 스펙트럼에 나타나는 간섭 패턴으로부터 모드 차단 주파수를 인식하고 이로부터 해저면 음속을 추정하기 위해 수치 모의 및 실험 결과 분석을 통해 고찰하였다. Pekeris 도파관 환경에 대한 수치 모의 결과는 주파수 변화에 따른 전달 손실 및 간섭 패턴 변화가 모드 차단 주파수와 밀접한 관련이 있으며 간섭 패턴의 변화로부터 모드 차단 주파수를 인식하는 것이 가능할 수 있음을 보여주었다. 수치 모의를 통해 고찰한 개념을 해상 실험을 통해 획득한 신호에 적용하여 모드 차단 주파수를 인식하고 해저면 음속을 추정하였다. 추정된 음속을 모델 입력 인자로 이용하여 예측한 전달 손실은 손실 수준 및 간섭 패턴에서 실험 결과 분석을 통해 산출한 것과 매우 유사한 결과를 나타내었다.

핵심용어: 광대역 신호, 주파수 영역 간섭 패턴, 모드 차단 주파수, 해저면 음속 추정

부고분야: 수중음향 분야 (5.1)

Results of the numerical simulation and experimental data analysis for identification of mode cutoff frequency and estimation of sound speed of seabed from the spectrum of acoustic signal received at fixed source-receiver range are presented. Model simulations for Pekeris waveguide show that the frequency-dependent propagation loss and interference pattern are closely related to mode cutoff frequencies and it could be possible to the identify them from the changes of interference pattern. The concept considered at numerical simulations is applied to signals acquired at sea test. Cutoff frequency and sound speed of seabed are estimated from the interference pattern of measured signal. Propagation loss predicted using the estimated sound speed of seabed as model input parameter shows similar estimation result compared to propagation loss derived from measured data.

Keywords: Broadband signal, Frequency-dependent interference pattern, Mode cutoff frequency, Seabed sound speed

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.1)

1. 서론

수중 음속의 수심에 따른 분포는 해양에서의 음파 전달 특성을 조절하는 가장 큰 환경 인자이다. 연안 해역에서의 일반적인 수중 음속 분포는 해수면 부근에서 가장 큰 값을 갖고 수심이 증가함에 따라 음속이 감소하여 음파의 하향 굴절을 초래하는 분포를 갖는다. 수심이 얇은

해역에서의 하향 굴절 음파 전달 환경은 필연적으로 해저면에서의 반사, 투과 및 굴절 등을 수반하게 되는데 이때에는 해저면의 밀도, 음속, 감쇄 계수 등과 같은 해저면의 음향 특성이 수중 음파 전달에서 필수적으로 고려하여야 하는 요소로 작용하게 된다.

수중에서 운용되는 소나의 성능 분석과 예측, 특히 원거리 음장 예측 목적을 위해서는 해저면의 실제 특성과는 다소 차이가 있더라도 해저면의 음향 효과를 설명할 수 있는 보다 단순화된 유사 (equivalent) 해저면이 좀더 유용할 수 있다[1]. 이러한 경우에 가장 단순하게는 해저면

책임저자: 이성욱 (swlee65@ihanyang.ac.kr)
426-791 경기도 안산시 상록구 사1동 1271번지
한양대학교 지구해양학과 해양음향연구소
(전화: 031-400-4156; 팩스: 031-406-6458)

을 유체의 성질을 가지는 반 무한평면으로 고려할 수도 있는데 이때는 해저면에 대한 밀도, 음속, 감쇠 계수의 3개 인자에 대한 정보만 필요하다. 이 중에서 해저면 음속이 반사 및 음파 전달에 미치는 영향이 가장 큰 인자이다.

소나 성능 예측 목적의 지음향 인자 획득을 위해 널리 사용되는 방법은 계획된 신호를 송신할 수 있는 음원과 수직 또는 수평 방향으로 여러 개의 센서를 배열하여 거리 변화에 따른 신호의 특성을 측정하고 수치 모델 계산을 반복적으로 수행하여 실험 결과와 가장 부합되는 모델 입력인자를 찾는 방법이다[3]. 이 방법은 원하는 대역의 신호를 송신할 수 있는 음원과 배열 센서를 구비하고 있는 경우에는 신뢰도가 높은 결과를 기대할 수 있을 것이나 노력과 비용이 많이 요구될 수도 있다.

따라서 보다 쉬우면서도 간단하게 접근하는 방법을 모색하고자 하는 취지에서 거리 변화를 고려하지 않고 고정된 거리에서 광대역 신호를 발생시키는 소모성 폭발 음원을 이용하고, 배열형 수신기가 아닌 한 개의 수신기를 이용하여 신호를 획득하고, 수치 모델 대신에 이론적 수식을 적용하여 천해에서의 해저면 음속을 추정하는 방법에 대해서 고찰하고자 한다.

폭발성 광대역 음원을 이용한 음장 측정은 오래 전부터 많이 수행하여 왔다. 하지만 수신 신호에 나타나는 간섭 특징에는 그다지 관심을 기울이지 않다가 최근에서야 비로소 이상적인 도파관에서의 주파수 영역 간섭 특성을 고드 간섭의 관점에서 해석한 연구가 보고되었다[4]. 이에 따르면 이상적인 도파관에서의 주파수 영역 간섭 특성은 거리 변화에 따른 간섭 패턴 변화와는 다르게 간섭 길이가 일정하지 않고 주파수가 증가함에 따라 간섭 길이가 증가할 뿐만 아니라 새로운 모드가 추가될 때에는 추가된 고드의 영향으로 간섭 길이가 감소하였다가 다시 증가하는 양상이 있으며, 간섭 길이가 증가하다가 감소하는 주파수 부근은 모드 차단 주파수와 관련이 있는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 해양을 이상적인 도파관이 아니라 보다 실제 환경에 가까운 Pekeris 도파관으로 고려하는 경우에 대하여 간섭 특성, 차단 주파수, 해저면 음속의 관계를 고찰하고 해상 실험을 통해 획득한 신호를 모드 간섭의 관점에서 분석하여 해저면 음속 추정에서의 활용 가능성을 파악하고자 하는 것이 목적이다.

II. 모드 차단 주파수 및 주파수 영역에서의 모드 간섭 효과

천해 음파 전달 환경을 간단히 생각하면 해양은 해수면과 해저면으로 경계 지어지는 하나의 음 도파관이라 할 수 있다. 도파관 내부에서의 음파 전달은 정상 모드 이론을 이용하여 설명하면 매우 편리하다.

정상 모드 이론은 거리와 수심 변화에 따른 파동 방정식의 해, 즉 음압을 수심 방향으로의 고유한 진동 특성을 나타내는 모드 함수와 거리 방향으로의 변동을 나타내는 Hankel 함수에 대한 점근식의 곱으로 나타내는 방법이다 [5]. 모드 함수의 해에 해당하는 각각의 정상 모드에는 도파관의 성질에 의해 결정되는 모드 차단 주파수가 존재하는데 차수가 높은 모드일수록 보다 높은 주파수에서 차단되고 차수가 낮은 모드일수록 보다 낮은 주파수에서 차단되는 성질이 있다. 차단되지 않고 도파관 내에서 전달되는 모드의 수는 음원 주파수와 밀접한 관련이 있는데 음원의 주파수가 높을수록 음장에 기여하는 모드 수는 많아지고 음원의 주파수가 낮을수록 모드 수는 감소한다. 따라서 저주파수 대역에서의 음파 전달을 정상 모드 이론으로 설명하면 차수가 낮은 몇 개의 모드만으로도 음장을 설명할 수 있는 장점이 있다.

해양을 수중의 밀도와 음속은 균일하고 해수면에서는 압력이 소멸하고 해저면은 음속과 밀도가 균일하면서 수중보다 큰 반 무한 유체면으로 가정하는 Pekeris 도파관이라 할 때, 도파관 즉 음파 전달 환경의 특성에 의해 결정되는 모드 차단 주파수 f_n^c 은

$$f_n^c = \frac{(n-1/2)c}{2h\sqrt{1-(c/c_1)^2}}, \quad n=1,2,\dots \quad (1)$$

으로 주어진다. 여기서 h 는 수심, c 는 수중 음속, c_1 은 해저면 음속을 나타낸다. 수심과 수중 음속을 알고 있는 경우에 모드 차단 주파수는 해저면 음속 c_1 에 의해 결정된다. 또한 차단 주파수는 해저면의 밀도 및 감쇠 계수와는 관계가 없는 요소임을 알 수 있다. 표 1은 수심이 104 m이고 수중 음속이 1512 m/s일 때 해저면 음속 변화에 따른 모드 차단 주파수를 계산한 것으로 해저면 음속이 변화함에 따라 차단 주파수도 변화함을 알 수 있다.

음원과 수신기가 모두 수중에 있으며 원거리 음장 조건을 만족할 때의 음의 세기 (intensity)를 정상 모드 이론을 이용하여 나타내면

표 1. 식 (1)을 이용하여 계산한 모드 차단 주파수, h=104 m, c=1512 m/s

Table 1. Mode cutoff frequencies calculated from (1), h=104 m, c=1512 m/s.

| c ₁ (m/s) | f _n (Hz) | | | |
|----------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | f ₁ | f ₂ | f ₃ | f ₄ |
| 1575 | 13.0 | 38.9 | 64.9 | 90.9 |
| 1650 | 9.1 | 27.2 | 45.4 | 63.6 |
| 1800 | 6.7 | 20.1 | 33.5 | 46.9 |
| 1950 | 5.8 | 17.3 | 28.8 | 40.3 |

$$I \sim \frac{\pi}{\rho^3 c} \left(\sum_{n=1}^{n_{max}} \frac{P_n^2}{k_n r} + 2 \sum_{n=1}^{n_{max}} \sum_{m>n} P_n P_m \frac{\cos(\Delta k_{nm} r)}{\sqrt{k_n k_m r}} \right) \quad (2)$$

으로 쓸 수 있다. 이때

$$P_n = A_n^2 \sin(k_{zn} z_s) \sin(k_{zn} z_r) \quad (3)$$

$$A_n = \sqrt{2} \left[\frac{1}{\rho} \left(h - \frac{\sin(2k_{zn} h)}{2k_{zn}} \right) + \frac{1}{\rho_1} \frac{\sin^2(k_{zn} h)}{k_{1zn}} \right]^{-1/2} \quad (4)$$

이다. 여기서 z_s와 z_r는 음원과 수신기의 수심, r은 거리, ρ와 ρ₁은 수중과 해저면의 밀도, k_n과 k_{zn}은 수중에서의 n번째와 m번째 모드의 수평 방향 파수, Δk_{nm}은 수평 방향 파수의 차이, k_{zn}과 k_{1zn}은 수중과 해저면에서의 n번째 모드의 수직 방향 파수를 의미한다. 그리고 n_{max}는 주어진 환경과 음원의 성질에 따라 결정되는 정상 모드의 최대 수를 나타낸다. 예를 들면 수심이 104 m, 수중 음속이 1512 m/s, 해저면 음속이 1575 m/s인 경우에 음원 주파수가 40 Hz이면 2개의 정상 모드가 원거리 음장에 기여함을 표 1로부터 짐작할 수 있다.

음의 세기를 나타내는 식에서 괄호 안의 첫 번째 항은 인접한 모드 사이의 간섭 (또는 중첩)을 고려하지 않을 때의 음의 세기에 해당하고 두 번째 항은 서로 다른 모드 사이의 간섭 (또는 중첩) 효과를 고려할 때의 세기를 나타낸다. 음원의 주파수가 일정할 때 모드 간섭을 고려하지 않을 경우의 음의 세기는 거리가 증가함에 따라 일정하게 감소하는 경향을 가진다. 하지만 모드 간섭 효과를 포함할 경우에는 코사인 (cosine) 항의 영향으로 음의 세기가 거리 변화에 따라 주기적으로 변동함을 알 수 있다. 반면에 음원과 수신기 사이의 거리가 고정되어 있는 경우에는 모드의 파수 값과 파수 차이에 의해 간섭 효과가 조절된다. 파수는 주파수의 함수이므로 음원의 주파수가 변화하면 거리 변화가 없더라도 모드 간섭 효과가 생길 수 있

음을 알 수 있다.

이상적인 도파관 환경에서 음원과 수신기 사이의 거리가 고정되어 있을 때 주파수 변화에 따른 음의 세기 변동 특성은 음의 세기가 상대적으로 최대가 되는 마루 (또는 골)와 마루 (또는 골) 사이의 길이를 나타내는 간섭 길이가 거리 변화에 따른 변동에서처럼 일정한 것이 아니라 주파수가 증가함에 따라 증가할 뿐만 아니라 새로운 모드가 추가될 때에는 추가된 모드의 영향으로 간섭 길이가 감소하였다가 다시 증가하는 양상이 있으며, 간섭 길이가 증가하다가 감소하는 부분은 모드 차단 주파수와 관계가 있음이 보고된 바 있다[4].

그림 1은 모드 이론에 근거한 수치 모델인 KRAKEN[6]을 이용하여 수심이 104 m이고 해저면 음속이 1575~1950 m/s 범위에서 서로 다른 값을 가지는 천해 환경에서 음원과 수신기가 18 m와 48 m 깊이에 위치하면서 3.7 km 떨어져 있을 때의 주파수 변화에 따른 전달 손실을 0.1 Hz 간격으로 계산한 것이다. 굵은 실선은 실제로 해양에서 측정된 음속 분포 (그림 2)를 입력했을 때의 결과이고 가는 실선은 수중 음속이 측정된 분포의 중간 값에 해당하는 1512 m/s로 균일한 분포를 한다고 가정할 경우의 결과이다. 해저면 음속에 해당하는 밀도는 대륙붕 환경에서의 전형적인 퇴적물에 대하여 제시된 음속에 해당하는 값을 적용하였다[2].

해저면 음속이 1575 m/s로 균일하고 수중 음속도 1512 m/s로 균일한 경우의 전달 손실 (그림 1(a)의 가는 실선)은 39.8 Hz 이전까지는 주파수 변화에 따른 손실 변화가 거의 없다가 39.8 Hz에서 손실이 갑자기 감소하는 불연속점이 발생함을 볼 수 있다. 이는 제 2 모드의 차단 주파수인 39.8 Hz 이전까지는 제 1 모드만 음장에 기여하다가 39.8 Hz 이후부터는 제 1 및 제 2의 2개 모드가 기여하기 때문에 나타나는 결과이다.

해저면 음속이 1650 m/s로 증가하는 경우 (그림 1(b)의 가는 실선)에는 제 2 모드의 차단 주파수가 27.8 Hz로 낮아질 뿐만 아니라 해저면 음속이 1575 m/s인 경우에서처럼 차단 주파수 부근에서 전달 손실의 불연속점이 발생함을 볼 수 있다. 불연속점이 발생하는 부분이 그림 1(a)보다는 뚜렷하지 않은데 이는 주어진 환경과 수신기 수심의 함수인 제 2 모드의 진폭이 상대적으로 작아졌기 때문으로 생각된다. 차단 주파수보다 높은 주파수에서는 2개 모드의 간섭에 의한 음 세기의 변화를 나타내는 식에서 짐작할 수 있는 바와 같이 주파수 변화에 따라 손실이 주기적으로 변화하는 징후가 있음을 알 수 있다.

모드 간섭 효과가 포함될 때의 주파수 변화에 따른 전

달 손실의 주기적 변동 양상은 해저면 음속이 보다 빠른 경우 (그림 1(c)의 가는 실선)에 더욱 분명하게 나타난다. 해저면 음속이 1800 m/s인 경우에 제 1 모드와 제 2 모드의 간섭에 의한 전달 손실 변동은 제 3 모드 차단 주파수인 34.0 Hz 부근까지 계속됨을 알 수 있다. 34.0 Hz 이상

에서 나타나는 변동은 제 3 모드의 추가로 인해 3개 모드의 간섭에 의한 결과이다.

모드 간섭이 있을 때의 주파수 변화에 따른 전달 손실 변동에서는 전달 손실이 상대적으로 최소인 마루와 마루 사이의 길이에 해당하는 간섭 길이가 주파수가 증가함에

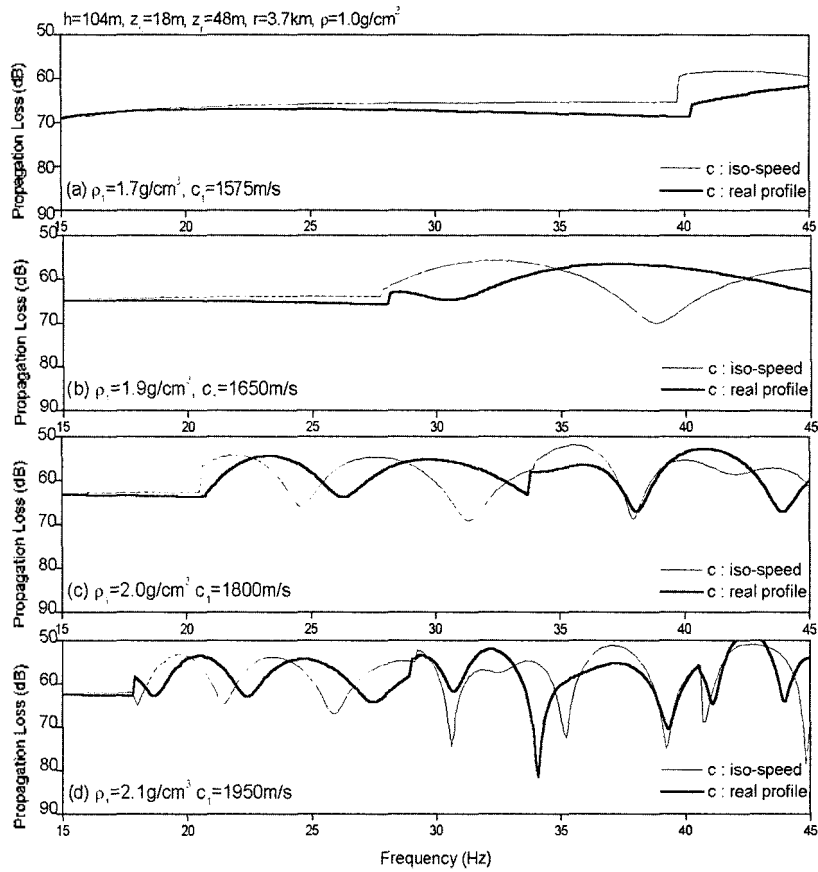


그림 1. 해저면 음속 변화에 따른 주파수 영역 전달 손실 및 간섭 형태 변화

Fig. 1. Variation of the frequency-dependent propagation loss and interference pattern at different sound speed of seabed.

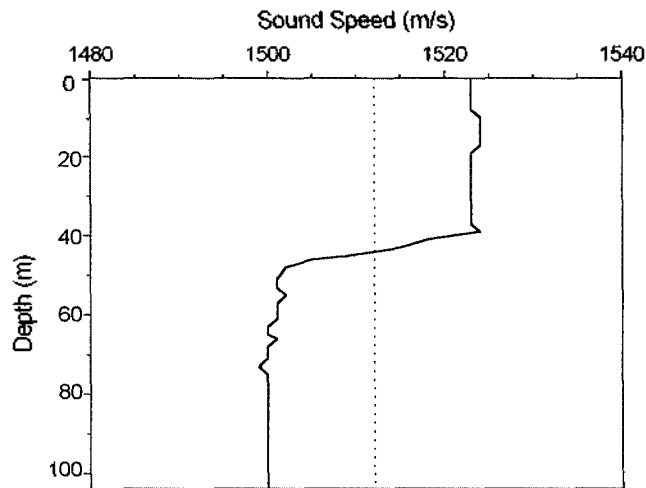


그림 2. 천해에서 획득한 XBT 자료로부터 계산한 수중 음속 분포

Fig. 2. Sound speed profile derived from XBT data acquired in a shallow water.

표 2. 수치 모의 결과에 나타나는 모드 차단 주파수 및 식 (1)에 의한 모드 차단 주파수와의 차이, h=104 m
 Table 2. Mode cutoff frequencies from numerical simulation and differences between model and analytic formula (1).

| c_1 (m/s) | f_n (Hz) | | | | | | Δf_n (%) | | | | | |
|-------------|------------|------|-------|------|-------|------|------------------|-----|--------------|-----|--------------|-----|
| | f_2 | | f_3 | | f_4 | | Δf_2 | | Δf_3 | | Δf_4 | |
| | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B |
| 1575 | 39.8 | 40.3 | - | - | - | - | 2.3 | 3.5 | - | - | - | - |
| 1650 | 27.8 | 28.1 | - | - | - | - | 2.2 | 3.2 | - | - | - | - |
| 1800 | 20.6 | 20.8 | 34.0 | 33.8 | - | - | 2.4 | 3.4 | 1.5 | 0.9 | - | - |
| 1950 | 17.9 | 18.0 | 29.2 | 29.0 | 40.7 | 40.5 | 3.4 | 3.9 | 1.4 | 0.7 | 1.0 | 0.5 |

A: homogeneous ocean, c: 1512 m/s
 B: stratified ocean, c: real profile

따라 증가하는 경향이 있을 뿐만 아니라 새로운 모드가 추가되는 주파수에서는 간섭 길이가 감소하였다가 다시 증가하는 경향이 있음을 볼 수 있다 (그림 1(d)의 가는 실선). 이는 차단 주파수를 나타내는 전달 손실의 불연속 점이 뚜렷하지 않은 경우에는 간섭 길이의 변화로부터 제 2 또는 제 3 모드의 차단 주파수를 인식하는 것이 가능함을 나타내는 것이라고 할 수 있다.

한편 표 1과 비교하면 모드 차단 주파수에 약간의 변화가 생겼음을 알 수 있다. 식 (1)을 이용하여 계산한 모드 차단 주파수 (표 1)는 수중 음속이 1512 m/s로 같은 경우에는 수치 모델 결과보다 1.0~3.4%, 그리고 실제의 수중 음속 분포를 입력한 경우에는 0.7~3.9% 정도 낮은 값을 갖는 것을 볼 수 있다 (표 2). 이는 수치 모델에서는 모드 진폭 P_n 을 계산할 때 해저면 밑도까지 고려하지만 식 (1)에서는 해저면 밑도를 고려하지 않기 때문에 발생하는 차이일 것이라 생각된다. 따라서 이러한 차이는 식 (1)을 이용하여 차단 주파수를 계산할 때 발생할 수 있는 오차라고 할 수 있을 것이다.

수치 모델 결과를 해저면 음속을 모르는 상태에서 측정 한 가상의 실험 결과라 할 때, 실험 결과에서 인식한 모드 차단 주파수와 실험 환경에서 측정된 수중 음속의 중간 값을 이용하여 식 (1)로부터 해저면 음속을 추정할 때에도 비슷한 수준의 오차가 발생할 수 있을 것이다. 이때 해저면 음속은 실제보다 낮게 추정될 수 있음을 짐작할 수 있다.

III. 해상 실험 결과에의 적용

앞 절에서는 수치 모의를 통해 주파수 대역 전달 손실의 변동 특성으로부터 모드 차단 주파수를 식별하고 이를 이용한 해저면 음속 추정 가능성을 고찰하였다. 본 절에

서는 앞 절에서 검토한 개념을 바탕으로 하여 해상 실험에서 획득한 광대역 음향 신호 수신 결과에 적용하고자 한다.

실험은 1997년 10월에 제주도 서쪽 해역에서 광대역 음파 전달 특성을 측정하기 위해 국방과학연구소와 한양대학교가 공동으로 수행하였다 (그림 3). 음향 신호는 수심이 104 m로 거의 평탄한 해역에서 5 m 간격으로 설치된 9개의 센서로 이루어진 수직 선배열형 수신기를 수심 33~73 m 부근에 위치하도록 하여 수신하였다. 이때 광대역 음원으로는 폭발성 음원인 SUS MK 64를 이용하여 수신기로부터 100 m, 300 m, 820 m, 3.7 km 떨어진 거리의 수심 18 m에서 폭발하도록 하였다.

실험에서는 9개의 수심에서 신호를 수신하였으나 여기에서는 수심 48 m에서 수신한 신호만 분석하였다. 이때 해·조류에 의한 배열 센서의 구배는 없는 것으로 가정하였다. 수신 신호는 8차 butterworth 대역 통과 필터를 적용하여 10 Hz 이하 성분은 차단한 후 분석하였다 (그림 4(a)). 수심 48 m 부근은 실험 해역에서 측정된 음속 분포 (그림 2)에서 볼 수 있는 바와 같이 음속의 기울기가 가장 큰 부분에 해당한다.

그림 4(b)는 음원으로부터 100 m 거리에서 수신된 신호에서 가장 먼저 도달한 성분의 파형을 나타낸 것이다. 충격파와 1차 기포 펄스 성분이 뚜렷이 나타남을 볼 수 있다. 그림 4(c)는 수신된 SUS 파형을 0.25 Hz 간격으로 주파수 분석한 후 수신기의 감도, 신호 이득, 대역 폭, 음원과 수신기 사이의 거리 등을 보정하여 음원 준위로 나타낸 것이다. 여기서 ESD (energy spectral density) 준위는 천이 신호의 스펙트럼 준위를 표시하는 척도[7]로서

$$ESD(f) = 10 \log_{10} \frac{|P(f)|^2}{|1 \mu Pa - sec|^2} \text{ dB re } \mu Pa^2 - sec / Hz \quad (5)$$

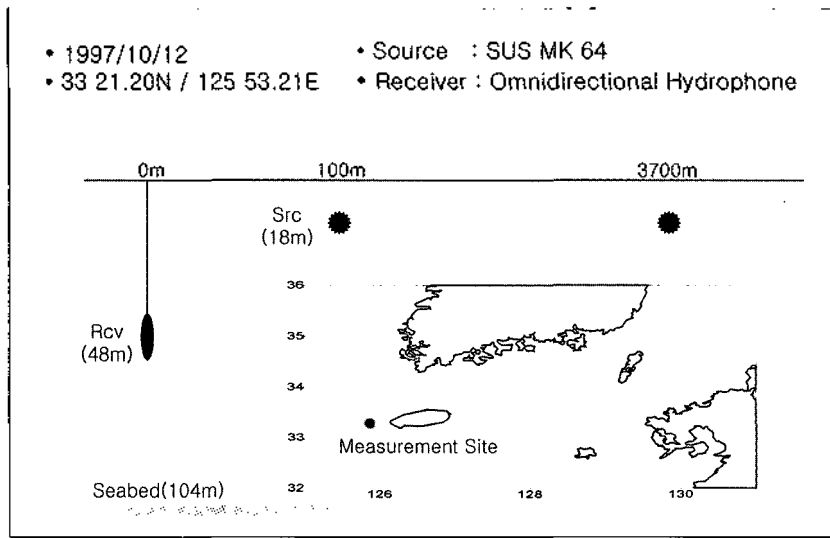


그림 3. 실험 해역 및 모식도
 Fig. 3. Experiment site and schematics of measurement.

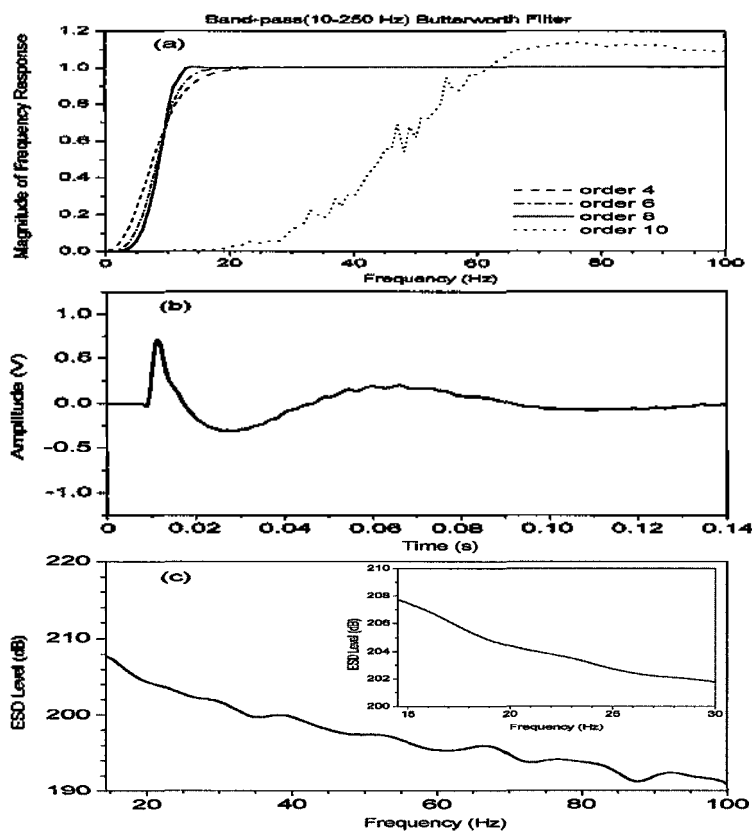


그림 4. Butterworth filter의 주파수 특성 (a) 100 m 거리에서 수신한 폭발성 음원의 파형 (b) 및 음원 준위 (c)
 Fig. 4. Frequency response of Butterworth filter (a) waveform received at 100 m (b) and source level (c) of explosive charge.

를 의미한다.

그림 5(a)는 음원과 수신기 사이의 거리가 3.7 km일 때 수신된 신호를 나타낸 것이고 그림 5(b)는 수신 신호를 0.25 Hz 간격으로 분석하였을 때의 스펙트럼 준위를 나타낸다.

수신 신호의 스펙트럼 특성은 앞 절에서 검토한 그림 1(d)의 전달 손실 간섭 특성에서 볼 수 있었던 것과 유사한 변동 양상을 보이므로 상호 비교 분석이 가능하다.

그림 1(d)에서는 18.0 Hz까지는 1개의 모드만 존재하여 전달 손실의 변동이 나타나지 않다가 18.0 Hz 이상에서부

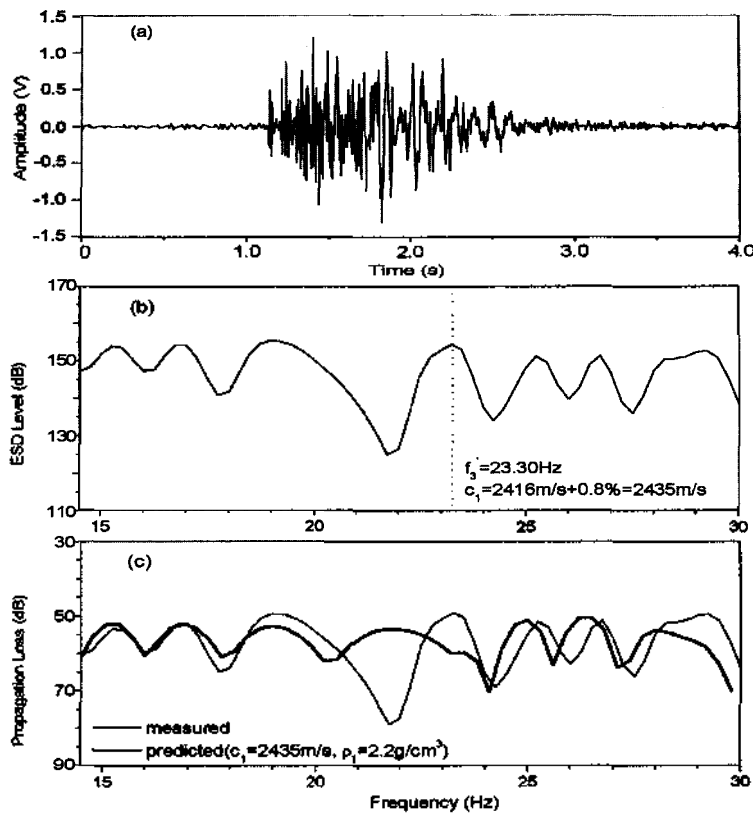


그림 5. 3.7 km 거리에서 수신한 폭발성 음원의 파형 (a) 스펙트럼 준위 (b) 및 전달 손실 (c)
 Fig. 5. Waveform (a) spectrum level (b) and propagation loss (c) of signal received at 3.7 km.

터는 제 2 모드의 추가로 인하여 2개 모드의 간섭에 의한 변동이 나타남을 볼 수 있다. 하지만 그림 5(c)에서는 거의 동일한 주파수 범위이지만 제 1 모드만의 영향이라 볼 수 있는 평탄한 스펙트럼 특성은 나타나지 않고 모드 간섭 효과라 볼 수 있는 스펙트럼 준위의 변동만 나타남을 볼 수 있다. 이는 제 1 모드의 차단 주파수가 보다 낮기 때문이라고 생각할 수 있고 이는 실험 해석의 해저면 음속이 1950 m/s보다는 크다는 것을 나타내는 것이라 할 수 있다.

그리고 그림 1(d)의 18.0 Hz 이상에서는 주파수가 증가함에 따라 간섭 길이가 증가하다가 감소하는 경향이 나타나고 이 부분이 제 3 모드의 차단 주파수 부근임을 알 수 있다. 이러한 경향은 그림 5(c)에서도 나타나는데 23.3 Hz에서 간섭 길이의 변화 양상이 바뀔 수 있다. 따라서 23.3 Hz를 제 3 모드의 차단 주파수라 하면 그림 1(d)의 제 3 모드 차단 주파수인 29.0 Hz보다 낮으므로 여기에서도 해저면 음속이 1950 m/s보다 큼을 짐작할 수 있다.

23.3 Hz를 제 3 모드의 차단 주파수라 하고 수중 음속을 신호 수신 해석에서 측정한 음속 분포 (그림 2)의 중간 값인 1512 m/s로 하여 식 (1)을 이용하여 해저면 음속을 추정하면 2416 m/s이다. 여기에 식 (1)을 사용하여 해저

면 음속을 계산할 때의 평균 오차 0.8%를 고려하면 (표 1) 해저면 음속은 2435 m/s가 된다.

간섭 특성 변화로부터 인식한 차단 주파수와 이를 이용한 해저면 음속 추정이 타당한지를 파악하기 위해 측정된 전달 손실과 수치 모델을 이용하여 계산한 전달 손실을 비교하였다 (그림 5(c)). 수중 음속은 실제 측정된 분포를 이용하고 해저면에 대해서는 추정된 음속 값과 이에 해당하는 일반적 밀도 값을 입력하여 계산한 수치 모델 결과는 전달 손실 수준뿐만 아니라 간섭 양상에 있어서도 실험 결과를 잘 설명함을 볼 수 있다.

IV. 결론

넓은 주파수 대역에 걸쳐 신호를 발생시키는 폭발성 음원 신호의 스펙트럼으로부터 음파 전달 특성 인자의 하나인 모드 차단 주파수를 인식하고 이를 이용하여 해저면 음속 정보를 추출하는 기법에 대하여 수치 모의와 실험 결과 분석을 통해 고찰하였다.

정상 모드 이론에 기반을 둔 수치 모델을 이용하여 음원과 수신기 사이의 거리가 고정되어 있을 때 주파수 및

해저면 음속 변화에 따른 전달 손실 변화 특성을 모의한 결과, 주파수 변화에 따른 전달 손실 변동은 모드 수의 변화와 밀접한 관련이 있으며 모드 수가 변하는 주파수, 즉 모드 차단 주파수는 해저면 음속 변화에 따라 민감하게 달라짐을 알 수 있었다. 또한 차단 주파수 부근에서는 전달 손실의 불연속적인 변화가 있거나 차단 주파수를 전후하여 간섭 길이의 변화 양상이 바뀌는 것과 같은 특징적인 변화가 나타나므로 주파수 영역 전달손실 변화로부터 모드 차단 주파수를 파악하고 이로부터 해저면 음속 추정이 가능할 수 있음을 파악하였다.

수치 모의를 통해 고찰한 접근이 실제 실험 결과에서도 가능한지를 확인하기 위하여 음원과 수신기 사이의 거리가 수심의 약 36배 되는 천해 환경에서 수신한 신호를 분석하였다. 수신 신호 분석 결과 수치 모의에서 나타났던 간섭 길이의 변화 양상이 특정한 주파수 부근에서 변화함을 파악할 수 있었으며 이를 토대로 해저면 음속을 추정하였다. 추정된 음속이 타당한지를 확인하기 위해 추정된 음속 값을 입력인자로 활용하여 예측한 전달 손실과 실험에서 구한 전달 손실을 비교한 결과 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 이 결과는 본 연구의 접근 방법을 이용한 해저면 음속 추정이 실제 환경에서도 가능할 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

본 논문에서 검토한 방법은 천해에서 정상 모드 이론을 적용할 수 있을 정도로 음원과 수신기 사이의 거리가 충분히 떨어져 있는 상태에서 음원의 파형을 알고 있거나 음원의 제원만으로 파형의 모의가 가능하여 음원 준위를 측정할 필요가 없는 경우에는 1개의 소모성 음원과 1개의 수신기만으로도 해저면 음속 추정이 가능할 수 있다는 점에서 매우 간편한 방법이라 할 수 있다. 따라서 신속하게 해저면 음향 특성을 진단하거나 보다 정밀한 해저면 음속 구조 추정을 위한 초기 값 산출 등에 활용이 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 수중음향 특화 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. D. M. F. Chapman, "What are we inverting for?," *Inverse Problems in Underwater Acoustics*, Springer, edited by M. I. Taroudakis & G. Makrakis, 1-14, 2001.
2. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, AIP Press, Chap. 1, 39-44, 2000.
3. A. Tolstoy, *Matched Field Processing for Underwater Acoustics*, World Scientific, Chap. 1, 1993.
4. M. Badley, K. P. Bongiiovanni and W. L. Siegmann, "Interpretation of frequency dependent transmission-loss interference pattern," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 22 (2), 219-225, 1997.
5. G. V. Frisk, *Ocean and Seabed Acoustics*, Prentice Hall, Chap. 5, 1994.
6. M. B. Porter, "The KRAKEN normal mode program," Naval Research Lab. Tech. Report, NRL/MR/5120-92-6920, 1992.
7. W. J. Marshall, "Descriptors of impulsive signal levels commonly used in underwater acoustics," *IEEE J. Oceanic Eng.*, 21 (1), 108-110, 1996.

저자 약력

● 이 성 욱 (Seongwook Lee)

1989년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이화사)
 1991년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이화석사)
 1991년 3월~1998년 2월: 국방과학연구소 (연구원)
 1998년 3월~현재: 한양대학교 지구해양과학과 (박사과정)
 ※ 주관심분야: 수중음향

● 한 주 영 (Jooyoung Hahn)

한국음향학회지 제22권 제3호 참조

● 김 남 수 (Namsoo Kim)

한국음향학회지 제22권 제6호 참조

● 나 정 열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제22권 제2호 참조

● 박 정 수 (Joung-Soo Park)

한국음향학회지 제22권 제2호 참조